

**М. П. Пузанов**

Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург  
puzanovmp@yandex.ru  
Научный руководитель — проф., д-р техн. наук Ю. Н. Логинов

## **ВЫВОД УРАВНЕНИЯ ПЛАСТИЧНОСТИ ХИЛЛА ДЛЯ ХОЛОДНОКАТАНОЙ ТОНКОЛИСТОВОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ**

Из холоднокатаного листа электротехнической стали были подготовлены плоские образцы с различной ориентацией относительно системы координат процесса прокатки. По итогам результатов испытаний на установке Shimadzu HVM-G21DT была получена зависимость среднего значения твердости холоднокатаной электротехнической стали от направления измерения. С помощью известной связи между условным пределом текучести материала и твердостью установили значения коэффициентов уравнения пластичности Хилла.

*Ключевые слова:* анизотропия, электротехническая сталь, модель пластичности Хилла.

**M. P. Puzanov**

## **HILL'S YIELD EQUATION CONCLUSION FOR COLD-ROLLED THIN SHEET ELECTRIC STEEL**

From the cold-rolled electrical steel sheet, flat samples with different orientations relative to the coordinate system of the rolling process were prepared. Based on the results of the on the Shimadzu HVM-G21DT unit test results, the dependence of the average hardness of the cold-rolled electrical steel on the measurement direction was obtained. Using the known relationship between the conditional yield strength of the material and the hardness, the coefficients of the Hill's plasticity equation were established.

*Key words:* anisotropy, electrical steel, Hill's yield criterion.

**В** настоящее время в области прокатного производства наиболее полно представлено решение краевой задачи пластической деформации с применением гипотезы об изотропности обрабатываемого материала. Вместе с тем, многие деформируемые материалы имеют определенный уровень анизотропии, и процессы деформации подоб-

ных материалов изучены недостаточно, несмотря на то, что анизотропия материала может в значительной степени влиять на процесс его обработки. Особенно это актуально для процесса холодной деформации, поскольку вызванная текстурой анизотропия механических свойств может существенно влиять на свойства готового изделия и после термической обработки [1–3]. К анизотропным материалам относятся многие магнитомягкие материалы, в том числе прокат из электротехнической стали [4–6].

Для определения коэффициентов анизотропии материала использовали электротехническую сталь промышленного производства следующего химического состава, %: 0,03 C; 3,2 Si; 0,3 Mn; 0,01 Ni; 0,015 Al; 0,002 Cr; 0,55 Cu; 0,003 Ti; 0,01 N. Полоса исследуемой стали была прокатана в холодном состоянии при начальной толщине 2,50 мм до конечной толщины 0,70 мм за 4 прохода с суммарным обжатием 72 %. Для расчета коэффициентов уравнения пластичности Хилла требуется проведение испытаний в нормальном к плоскости листа направлении, поэтому наиболее подходящим методом исследования механических свойств тонколистового материала является измерение микротвердости. Из холоднокатаного листа были подготовлены плоские образцы размером 0,70×10×20 мм с различной ориентацией относительно системы координат процесса прокатки (рис. 1). Всего подготовлено 12 образцов, по 3 образца одной ориентации.

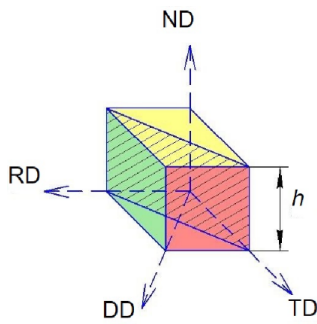


Рис. 1. Схема измерения микротвердости образцов: RD — направление прокатки (зеленая грань), TD — поперечное направление (красная грань), ND — нормальное направление (желтая грань), DD — диагональное направление (заштрихованная грань),  $h$  — толщина холоднокатаного листа

Перед испытаниями исследуемая поверхность каждого образца была подготовлена методом травления на зерно в 10 % растворе азотной кислоты, далее методом горячей запрессовки образцы помещались в метакрилат. Испытания проводили на установке Shimadzu HVM-G21DT

вдавливанием четырехгранной пирамиды с квадратным основанием по методу восстановленного отпечатка согласно ГОСТ 9450–76, величина статической нагрузки составила 0,049 Н. Для повышения достоверности результатов анализа на каждом образце проводили по 5 измерений с определенным шагом.

По итогам статистической обработки результатов испытаний была получена зависимость среднего значения твердости холоднокатаной электротехнической стали от направления измерения. Связь между условным пределом текучести материала при растяжении  $\sigma_{0,2}$  и числом единиц твердости HV возможно установить по формулам, полученным на основании решения задачи внедрения клинового индентора в пластическую среду методом линий скольжения [7], результаты показаны в табл. 1.

Таблица 1

**Твердость и предел текучести электротехнической стали**

Характеристика, МПа	Направление			
	RD	ND	TD	DD
HV	374,8	369,5	359,8	348,8
$\sigma_{0,2}$	920,5	907,7	883,9	856,8

Из таблицы видно, что наибольшему упрочнению материал подвергается в направлении прокатки, похожие результаты были получены для холоднокатаной нержавеющей стали [8].

Модель текучести Хилла для электротехнической стали построена в соответствии с уравнением, представленном в работе [9]. Значения коэффициентов  $F$ ,  $G$ ,  $H$  определили согласно данным таблицы. Значения коэффициентов  $L = M = N = 1,5$  приняли на основе сведений, полученных для высокопрочной низкоуглеродистой стали (HSLA) и представленных в работе [10]. В итоге получено следующее уравнение, описывающее пластическое течение электротехнической стали с учетом анизотропии ее механических свойств.

$$0,66(\sigma_{YY} - \sigma_{ZZ})^2 + 0,56(\sigma_{ZZ} - \sigma_{XX})^2 + 0,62(\sigma_{XX} - \sigma_{YY})^2 + 3\sigma_{YZ}^2 + 3\sigma_{ZX}^2 + 3\sigma_{XY}^2 = 1.$$

## ЛИТЕРАТУРА

- 1 Influence of heat treatment on the microstructure, texture and formability of 2024 aluminium alloy / C. K. S. Moy [et al.] // Materials Science and Engineering: A. 2012. V. 552. P. 48–60.
- 2 Elsner A., Kaspar R., Ponge D. Recrystallization texture of cold rolled and annealed IF steel produced from ferritic rolled hot strip // Materials Science Forum. 2004. V. 467–470, № 1. P. 257–262.

- 3 Chen Q. Pan Q., Wei L. Microstructures and properties of Al-Mg-Sc aluminum alloy sheet at different orientations // *Journal of Central South University (Science and Technology)*. 2013. V. 44, № 3. P. 921–929.
- 4 Shekhawat S. T. Magnetic properties in deformed grain oriented steel: on the role of strain hardening exponent and microstructural developments // *ISIJ International*. 2012. V. 52, № 11. P. 2100–2108.
- 5 Solovei V. D., Loginov Yu. N., Puzanov M. P. Evaluating the flow stress of electrical steel under cold rolling in terms of the strain-rate hardening effect // *AIP Conference Proceedings*. 2016. V. 1785, № 040075. P. 1–4.
- 6 Kononov A. A., Zotov O. G., Shashurin A. I. Distribution of crystallographic orientations in an anisotropic electrical steel under rolling stages // *Metal Science and Heat Treatment*. 2014. № 8. P. 49–53.
- 7 Богатов А. А. Механические свойства и модели разрушения металлов : учебное пособие для вузов. Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2002. 329 с.
- 8 Finelli A., Labanti M. Analysis of the influence of the anisotropy induced by cold rolling on duplex and super-austenitic stainless steels // *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2010. № 13. P. 24–30.
- 9 Писаренко Г. С., Можаровский В. С. Уравнения и краевые задачи теории пластичности и ползучести : справочное пособие. Киев : Наук. думка, 1981. 496 с.
- 10 Prates P. A., Oliveira M. C., Fernandes J. V. On the equivalence between sets of parameters of the yield criterion and the isotropic and kinematic hardening laws // *Int. J. Mater. Form.* 2015. № 8. P. 505–515.